

Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/JP05/003785

International filing date: 04 March 2005 (04.03.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: JP
Number: 2004-062728
Filing date: 05 March 2004 (05.03.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 20 May 2005 (20.05.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日
Date of Application: 2 0 0 4 年 3 月 5 日

出 願 番 号
Application Number: 特 願 2 0 0 4 - 0 6 2 7 2 8

パリ条約による外国への出願
に用いる優先権の主張の基礎
となる出願の国コードと出願
番号

The country code and number
of your priority application,
to be used for filing abroad
under the Paris Convention, is

J P 2 0 0 4 - 0 6 2 7 2 8

出 願 人
Applicant(s): 古河電気工業株式会社
多久島 裕一

2 0 0 5 年 4 月 2 7 日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

小 川



【書類名】 特許願
【整理番号】 P0402030
【あて先】 特許庁長官殿
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号 古河電気工業株式会社内
 【氏名】 相曾 景一
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号 古河電気工業株式会社内
 【氏名】 忠隅 昌輝
【発明者】
 【住所又は居所】 神奈川県横浜市港北区日吉本町 3 - 2 4 - 3 ラベル日吉 I I 3
 0 6 号
 【氏名】 多久島 裕一
【特許出願人】
 【識別番号】 000005290
 【氏名又は名称】 古河電気工業株式会社
【特許出願人】
 【住所又は居所】 神奈川県横浜市港北区日吉本町 3 - 2 4 - 3 ラベル日吉 I I 3
 0 6 号
 【氏名又は名称】 多久島 裕一
【代理人】
 【識別番号】 100101764
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 川和 高穂
【手数料の表示】
 【予納台帳番号】 034522
 【納付金額】 21,000円
【提出物件の目録】
 【物件名】 特許請求の範囲 1
 【物件名】 明細書 1
 【物件名】 図面 1
 【物件名】 要約書 1
 【包括委任状番号】 9805685

【書類名】 特許請求の範囲

【請求項 1】

共振器内に、正常分散を有する光ファイバと、異常分散を有する光ファイバと、利得媒体としての希土類添加光ファイバと、モード同期機構とを備えたファイバレーザであって、前記正常分散を有する光ファイバとして少なくとも前記希土類添加光ファイバを含み、前記希土類添加ファイバの長さが前記異常分散を有する光ファイバの長さよりも短く設定されていることを特徴とするファイバレーザ。

【請求項 2】

共振器内に、正常分散を有する光ファイバと、異常分散を有する光ファイバと、利得媒体としての希土類添加光ファイバと、モード同期機構とを備えたファイバレーザであって、前記正常分散を有する光ファイバとして少なくとも前記希土類添加光ファイバを含み、前記希土類添加ファイバにおける出力光スペクトルの中心波長での単位長さあたりの正常分散絶対値が、前記異常分散を有する光ファイバの単位長さあたりの異常分散絶対値よりも大きく設定されていることを特徴とするファイバレーザ。

【請求項 3】

共振器内に、正常分散を有する光ファイバと、異常分散を有する光ファイバと、利得媒体としての希土類添加光ファイバと、モード同期機構とを備えたファイバレーザであって、前記正常分散を有する光ファイバとして少なくとも前記希土類添加光ファイバを含み、前記希土類添加光ファイバにおける非線形係数を γ_1 [1/W/m]、長さを L_1 [m]、異常分散ファイバを含む共振器を構成する他の部分における実効的な非線形係数を γ_2 [1/W/m]、長さを L_2 [m]、とすると、 $\gamma_1 L_1 / (\gamma_2 L_2)$ が 1 より大きいことを特徴とするファイバレーザ。

【請求項 4】

前記共振器における出力光スペクトルの中心波長における総分散が $-0.08 \sim +0.02 \text{ ps}^2$ の範囲内の値となるように調整されることを特徴とする、請求項 1 から 3 の何れか 1 項に記載のファイバレーザ。

【請求項 5】

前記希土類添加光ファイバのコア部分に少なくともエルビウム (Er) イオンが添加されていることを特徴とする、請求項 1 から 4 の何れか 1 項に記載のファイバレーザ。

【請求項 6】

Er が添加された前記希土類添加光ファイバの波長 $1.53 \mu\text{m}$ 帯における吸収係数のピーク値が $10 \text{ dB/m} \sim 35 \text{ dB/m}$ の範囲内に設定されていることを特徴とする、請求項 5 に記載のファイバレーザ。

【請求項 7】

前記共振器における前記希土類添加光ファイバの波長 $1.55 \mu\text{m}$ における分散値が $21 \text{ ps}^2/\text{km}$ 以上であることを特徴とする、請求項 5 または 6 に記載のファイバレーザ。

【請求項 8】

前記希土類添加光ファイバにおける波長 $1.55 \mu\text{m}$ での分散値を D [ps^2/m]、波長 $1.53 \mu\text{m}$ 帯での吸収ピーク値を α [dB/m] とするとき、吸収値と分散値の比 α/D [dB/ps^2] の値が 500 以上であることを特徴とする、請求項 5 から 7 の何れか 1 項に記載のファイバレーザ。

【請求項 9】

前記共振器に励起光を注入するための励起光源、前記励起光源からの励起光を合波する光合波器を備えており、前記共振器は、希土類添加光ファイバ、シングルモード光ファイバ、偏波ビームスプリッタ、光アイソレータ、偏光板からなっていることを特徴とする、請求項 1 から 8 の何れか 1 項に記載のファイバレーザ。

【請求項 10】

請求項 1 から 9 の何れか 1 項に記載のファイバレーザを用いた広帯域光源であって、前記ファイバレーザにおける出力側に少なくとも高非線形ファイバが接続され、スーパーコンテニウム (SC) 光を発生させていることを特徴とする広帯域光源。

【書類名】 明細書

【発明の名称】 希土類添加ファイバを使用する光ファイバレーザ及び広帯域光源

【技術分野】

【0001】

本発明は希土類添加ファイバを使用する光ファイバレーザ及び広帯域光源に関するものである。

【背景技術】

【0002】

波長スペクトルが広帯域で低コヒーレントなパルス光源は、光断層面撮影や光ファイバセンシングといった様々な分野での応用が期待されている。このような特徴を有する光パルスの発生方法として、発光ダイオード（LED）を用いたパルス発生が考えられる。またエルビウム（Er）ドープファイバ（EDF）等を用いた光ファイバアンプから発生する増幅自然放出光（ASE）を光源とすることによって低コヒーレントな光を得ることができる。しかしLEDでは高強度の光を得ることはできず、光ファイバアンプによるASE光もその波長スペクトルが増幅媒体の発光帯域に制限されてしまう。

【0003】

またErドープファイバを増幅媒体に用いたモード同期ファイバレーザにより、波長スペクトルが広帯域な光パルスを発生した例がある（非特許文献1参照）。これは非線形偏波回転現象を受動モードロック機構としたストレッチパルスファイバレーザによりコヒーレンス長の短い広帯域（44 nm）な発振を実現したものである。

【0004】

一般にパルスファイバレーザの発振現象を見るとパルスモードとノイズライクモードという2つの発振モードが存在する。パルスモードとは通常のフーリエ変換限界（TL）パルスを発振するモードであり、高エネルギー（～数nJ）かつ超短パルス（サブ100fs）発振が報告されている（非特許文献2参照）。一方、ノイズライクモードとは短パルス成分が数10psの範囲で束状になって存在する発振状態である。上述した広帯域パルス発生の際はノイズライクモードの発振である。ノイズライクモード発振における波長スペクトルは広帯域でその変化が緩やかな点に特徴がある。

【0005】

またソリトンパルスを発振するファイバレーザではスペクトルにリップルが生じる場合があるが、ノイズライクモード発振においてはそのような現象は起こらない。またこのノイズライクモード発振におけるパルス光の強度は、平均で10mW、ピーク値で15Wであり（非特許文献1参照）、LED光源やASE光源に比較して高強度出力が可能な利点がある。

【0006】

しかしながら非特許文献1の例では、発振した波長帯域は増幅媒体であるErの利得帯域に限られており、より広帯域な波長スペクトルを有するパルス光源が望まれている。

【0007】

またスーパーコンティニュームを発生させる超短パルスレーザを低分散光ファイバに注入することにより超広帯域光源を構成する方法が従来提案されており、文献（非特許文献3）では波長1100nmから2200nmにわたる広帯域光が得られているが、数ナノメートル程度の細かい周期で15dB程度のリップルが残留しており、前述の応用には不向きであり、超広帯域光発生においてリップルの低減が課題となっている。

【非特許文献1】 H.Horowitz et al., "Noiselike pulse with a broadband spectrum generated from an erbium-doped fiber laser", Opt. Lett., Vol22, pp.799-801, 1997

【非特許文献2】 L.B.Nelson et al., "Efficient frequency doubling of a femtosecond fiber laser", Opt. Lett., Vol21, pp.1759-1761, 1996

【非特許文献3】 BR. Washburn et al., "A phase locked frequency comb from an all-fibre supercontinuum source," Proc. of European Conference on Optical Communication 2003 (ECOC2003), Post-deadline paper Th 4.1.2, Rimini, Italy,

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

本発明は、上述したような光源の広帯域化の要求に応えるためになされたものであり、この発明の目的は、ノイズライクレーザにおいて、より広帯域な出力特性を有するファイバレーザおよび光源を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0009】

上記目的を達成するため、本発明では広帯域でノイズライクなパルスの発振に適した共振器の分散マップを設計し、 $1.5\mu\text{m}$ 帯で最も広い帯域幅をもつノイズライクレーザを作製した。このようなファイバレーザおよび広帯域光源は、具体的には下記からなっている。

【0010】

この発明のファイバレーザの第1の態様は、共振器内に、正常分散を有する光ファイバと、異常分散を有する光ファイバと、利得媒体としての希土類添加光ファイバと、モード同期機構とを備えたファイバレーザであって、前記正常分散を有する光ファイバとして少なくとも前記希土類添加光ファイバを含み、前記希土類添加ファイバの長さが前記異常分散を有する光ファイバの長さよりも短く設定されていることを特徴とするファイバレーザである。

【0011】

この発明のファイバレーザの第2の態様は、共振器内に、正常分散を有する光ファイバと、異常分散を有する光ファイバと、利得媒体としての希土類添加光ファイバと、モード同期機構とを備えたファイバレーザであって、前記正常分散を有する光ファイバとして少なくとも前記希土類添加光ファイバを含み、前記希土類添加ファイバにおける出力光スペクトルの中心波長での単位長さあたりの正常分散絶対値が、前記異常分散を有する光ファイバの単位長さあたりの異常分散絶対値よりも大きく設定されていることを特徴とするファイバレーザである。

【0012】

この発明のファイバレーザの第3の態様は、共振器内に、正常分散を有する光ファイバと、異常分散を有する光ファイバと、利得媒体としての希土類添加光ファイバと、モード同期機構とを備えたファイバレーザであって、前記正常分散を有する光ファイバとして少なくとも前記希土類添加光ファイバを含み、前記希土類添加光ファイバにおける非線形係数を γ_1 [1/W/m]、長さを L_1 [m]、異常分散ファイバを含む共振器を構成する他の部分における実効的な非線形係数を γ_2 [1/W/m]、長さを L_2 [m]、とするとき、非線形係数と長さの比 $(\gamma_1 L_1) / (\gamma_2 L_2)$ が1より大きいことを特徴とするファイバレーザ。

【0013】

この発明のファイバレーザの第4の態様は、前記共振器における出力光スペクトルの中心波長における総分散が $-0.08 \sim +0.02\text{ps}^2$ の範囲内の値となるように調整されることを特徴とするファイバレーザである。

【0014】

この発明のファイバレーザの第5の態様は、前記希土類添加光ファイバのコア部分に少なくともエルビウム (Er) イオンが添加されていることを特徴とするファイバレーザである。

【0015】

この発明のファイバレーザの第6の態様は、Erが添加された前記希土類添加光ファイバの波長 $1.53\mu\text{m}$ 帯における吸収係数のピーク値が $10\text{dB/m} \sim 35\text{dB/m}$ の範囲内に設定されていることを特徴とするファイバレーザである。

【0016】

この発明のファイバレーザの第7の態様は、前記共振器における前記希土類添加光フ

ファイバの波長 $1.55 \mu\text{m}$ における分散値が $21 \text{ ps}^2/\text{km}$ 以上であることを特徴とするファイバレーザである。

【0017】

この発明のファイバレーザの第8の態様は、前記希土類添加光ファイバにおける波長 $1.55 \mu\text{m}$ での分散値を $D [\text{ps}^2/\text{m}]$ 、波長 $1.53 \mu\text{m}$ 帯での吸収ピーク値を $\alpha [\text{dB}/\text{m}]$ とするとき、吸収値と分散値の比 $\alpha/D [\text{dB}/\text{ps}^2]$ の値が500以上であることを特徴とするファイバレーザである。

【0018】

この発明のファイバレーザの第9の態様は、前記共振器に励起光を注入するための励起光源、前記励起光源からの励起光を合波する光合波器を備えており、前記共振器は、希土類添加光ファイバ、シングルモード光ファイバ、偏波ビームスプリッタ、光アイソレータ、偏光板からなっていることを特徴とするファイバレーザである。

【0019】

この発明の広帯域光源の第1の態様は、上述したファイバレーザを用いた広帯域光源であって、前記ファイバレーザにおける出力側に少なくとも高非線形ファイバが接続され、スーパーコンテニューム(SC)光を発生させていることを特徴とする広帯域光源である。

【発明の効果】

【0020】

Er添加ファイバの利得帯域幅を大きく上回る平坦で広帯域なスペクトルを有するファイバレーザを提供することができる。更に、このファイバレーザを用いることにより、広帯域な光源を提供することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0021】

以下に図面を参照して、本発明に係るファイバレーザ、及びそれを用いた広帯域光源の好適な実施の形態を説明する。図面の記載において同一または類似部分には同一または類似な符号を付している。

この発明において、共振器における出力光スペクトルの中心波長における総分散が $-0.08 \sim +0.02 \text{ ps}^2$ の範囲内の値となるように調整される。その理由は次の通りである。

【0022】

まず、異常分散側の累積分散量の上限を、ストレッチパルスレーザ（分散マネジメントソリトン）の理論を援用して求める。下記式で表される分散マップの強度が10を超えるとパルス解が得られにくくなる。

$$S = (\beta_{21}L_1 - \beta_{22}L_2) / T_{\text{FWHM}}^2$$

ここで、 β_{21} 、 L_1 は、正常分散ファイバにおける分散、長さであり、 β_{22} 、 L_2 は、異常分散ファイバにおける分散、長さである。また、 T_{FWHM} は、パルスの半値全幅である。

【0023】

パルス幅として短めに見積もって 200 fs とし、 $S=10$ とすると、異常分散側の総分散量として -0.2 ps^2 程度になる。従って、上限としてその40%くらいを考慮して -0.08 ps^2 が求められる。

半値全幅 0.5 ps の sech^2 パルスの1分散長相当の総分散が 0.08 ps^2 程度であるので、 -0.08 ps^2 を超える範囲でパルスレーザを作製するのは不可能である。また、正常側のトレランスは殆ど無く、分散マネジメントをかけた状態で異常分散側の分散量の5から10%を超える量の正常分散が残留した状態では安定解を得るのは困難である。従って、実現可能なファイバレーザにおいて、共振器における出力光スペクトルの中心波長における総分散が $-0.08 \sim +0.02 \text{ ps}^2$ の範囲内の値となるように調整される。

【0024】

更にこの発明においては、希土類添加光ファイバにおける波長 $1.55 \mu\text{m}$ での非線

形係数を γ_1 [1/W/m]、長さを L_1 [m]、異常分散ファイバを含む共振器を構成する他の部分の波長 $1.55\ \mu\text{m}$ における実効的な非線形係数を γ_2 [1/W/m]、長さを L_2 [m]、とするとき、非線形係数と長さの比 $(\gamma_1 L_1) / (\gamma_2 L_2)$ が1より大きい。

【0025】

図10にレーザファイバの動作条件を示す。非線形係数と長さの比 $(\gamma_1 L_1) / (\gamma_2 L_2)$ が1より大きくならなければならない根拠は、これまでのファイバレーザでは非線形比(図10では横軸の γ')が1以下で設計されており、1を超えるところで、スペクトルが広がる効果が顕著になるからである。図10において、従来のファイバレーザでの動作条件を白丸で示す。

【0026】

また、EDFの利得帯域を大きく超える光パルスが発生させるためには、実効的な非線形性の比 γ' ($\gamma_1 L_1) / (\gamma_2 L_2)$)を1よりも高くする必要がある。但し、 γ_1 [1/W/m]と L_1 [m]は正常分散ファイバ(EDF)における波長 $1.55\ \mu\text{m}$ での非線形係数と長さを、 γ_2 [1/W/m]と L_2 [m]は異常分散ファイバを含む共振器を構成する他の部分の波長 $1.55\ \mu\text{m}$ における実効的な非線形係数と長さを表す。

【0027】

数値シミュレーション例を図11に示す。横軸は共振器の長手方向の正規化距離を現しており、0から0.25、0.75から1.0の区間が異常分散ファイバ、0.25から0.75の区間が正常分散ファイバ(EDF)を表す。リング共振器を構成しているため周期的にこの変化を繰り返しており、0.と1.0は同じ点を表す。図11(a)がパルス幅の変化、図11(b)がスペクトル幅の変化を表しているが、非線形比 γ' が1を大きく超えると異常分散ファイバ中の midpoint 付近でスペクトル拡大がおり、正常分散ファイバ中では狭いスペクトルが保たれる。

【0028】

従って、増幅中はスペクトルが狭くなり利得媒質の帯域制限を超える光パルスが得られる。なお、後述する実施形態1において、非線形比は4程度である。実施形態1では正常分散ファイバであるEDFと他の異常分散ファイバで非線形係数がそれほど大きく変わらないため、広帯域なスペクトルを得るためには異常分散ファイバの長さを正常分散ファイバよりも十分に長くする必要がある。

(実施形態1)

【0029】

先ず、本発明における第1実施形態について説明する。図1はこの発明の第1実施形態のファイバレーザの構成図である。図1に示すように、この形態のファイバレーザは、パルスの進行方向に沿って、分散シフトファイバ(DSF)21、シングルモードファイバ(SMF)31、Er添加光ファイバ(EDF)11、Corning Flexcore(商標名)1060ファイバ41、光合波(WDM)カプラ66、シングルモードファイバ(SMF)32、分散シフトファイバ(DSF)22、 $1/4\lambda$ 偏光板61、 $1/2\lambda$ 偏光板62、偏波ビームスプリッタ(PBS)63、アイソレータ(IS0)64、 $1/4\lambda$ 偏光板65が順次配置され、これらを通して、再び分散シフトファイバ(DSF)21に戻るリング形状の共振器からなっている。

【0030】

励起光源71からの励起光は、光合波(WDM)カプラ66を通してCorning Flexcore 1060ファイバ41に結合され、後方励起配置によってEr添加光ファイバ(EDF)11をポンプしている。第1実施形態では励起光源71として1480nm帯の励起光源を用いている。また出力光はアウトプットポート81を通して取り出され、光スペクトルアナライザ、またはオートコリレータに入射させて、その波形を観測した。本発明者らは第1実施形態の共振器における各ファイバの分散、並びにEr添加光ファイバ(EDF)の吸収値を考慮して、広帯域でノイズライクなパルス発振を実現するために適した分散マップを設計した。

【0031】

具体的にはEr添加光ファイバ(EDF)11の波長 $1.55\ \mu\text{m}$ における分散値は、3

8. $4 \text{ ps}^2/\text{km}$ と大きな正常分散を有するEr添加光ファイバ(EDF)を使用し、第1実施形態の共振器における総分散を波長 $1.55 \mu\text{m}$ で -0.029 ps^2 となるように設計した。この時、第1実施形態の共振器に用いた各光ファイバの長さは、それぞれ、DSF 21; 1.8 m、SMF 31; 2.4 m、EDF 11; 2.5 m、Corning Flexcore1060ファイバ 41; 3.0 m、SMF 32; 2.5 m、DSF 22; 1.8 mであり、総ファイバ長は14.0 mとした。

【0032】

上述したように、第1実施形態の共振器では大きな正常分散を有するEDFを使用することにより、正常分散を有するEDF 11の長さを異常分散ファイバの長さよりもずっと短くすることができる。これにより異常分散領域での非線形効果の影響が高まり、スペクトル広がりをより促進することができる。従って、上述した実施形態に示す構造を備えたファイバレーザによって、ノイズライクモード発振が容易となり、より広帯域な発振が可能となる。

【0033】

これを検証するため、実際にこの第1実施形態のファイバレーザにおける出力スペクトルを観測したところ、図2に示すように、波長 $1.55 \mu\text{m}$ を中心に3 dB帯域幅が87 nmと平坦で広帯域なスペクトルが得られた。上述した出力スペクトルは、Er添加ファイバの利得帯域幅を大きく上回るスペクトルであり、この発明によって、従来のEr添加ファイバを用いたファイバレーザ(帯域幅44 nm、非特許文献1参照)よりも広帯域な特性を実現することに成功したことがわかる。この時の出力光強度は72 mW、励起光源71の励起光パワー(波長 $1.48 \mu\text{m}$)は1.5 Wであった。

【0034】

励起光パワーを420 mW以上とすると、偏光板61、62、65を回転させて、容易にモード同期を達成することができた。基本繰り返し周波数は14.3 MHzである。また図3は出力光の非共軸オートコリレータによる自己相関波形である。中心付近に100フェムト秒程度の幅を有する成分が観測され、少なくとも数百フェムト秒のパルス幅を有するパルス成分が存在することがわかる。また、下部にある10ピコ秒程度の幅を有する台(ベDESTAL)がノイズライクパルスの包絡線を表しており、全体としてパルス光を構成していることがわかる。図3から明らかなように、少なくとも数百フェムト秒のパルス幅を有するパルス成分が存在することがわかる。

【0035】

図12は実施形態1のファイバレーザにおける出力光の時間波形を示すグラフである。即ち、図12は、100 MHz帯域を有するフォトディテクタを用いて観測された光強度の時間変化である。図12に示すように、70ナノ秒間隔でパルスが発生しており、モード同期動作をしていることがわかる。

【0036】

共振器内での累積正常分散を異常分散ファイバで補償する場合には、第1実施形態に示すように、正常分散ファイバの長さを異常分散ファイバの長さよりも短くすることが必要であり、そのためには、正常分散ファイバであるEDFの分散値絶対値が異常分散ファイバの異常分散より大きくなければならない。

【0037】

上記第1実施形態においては、異常分散ファイバとして標準的なSMF(波長 $1.55 \mu\text{m}$ での分散値 $-2.1 \text{ ps}^2/\text{km}$)を用いた。この場合、正常分散ファイバの長さを異常分散ファイバの長さよりも短くするためには、正常分散ファイバであるEDFの分散値が、異常分散ファイバSMFの分散値絶対値 $2.1 \text{ ps}^2/\text{km}$ より大きいことが必要である。従って、本第1実施形態におけるEDFの波長 $1.55 \mu\text{m}$ での分散値は $2.1 \text{ ps}^2/\text{km}$ 以上であることが、広帯域なノイズライクモード発振の観点から望ましい。

【0038】

共振器内における各分散領域での好適な分散値は $0.5 \times (\text{スペクトルの拡大係数}) \div (\text{スペクトル幅})^2$ で求めることができる。本実施形態のようにノイズライクパルスで

、実効的なスペクトル幅が60 nm程度であるとき、好適な分散値は0.05から0.10 ps^2 程度の範囲内の値になる。本実施形態では、EDF 11の波長1.55 μm における分散値は38.4 ps^2/km 、使用長は2.5 mであり、正常分散領域での総分散は0.096 ps^2 となる。

【0039】

実際の共振器の設計にあたっては、上述した好適な分散値になるように、各分散領域ファイバの分散値に応じて、その長さが決定される。本実施形態のようなノイズライクモードでの発振では、正常分散ファイバであるEDFでの分散値をなるべく大きくして、異常分散ファイバの長さに比して正常分散ファイバの長さをより短くすることが有効である。しかしながらEDFの短尺化により、EDFで得られる出力が減少するため、短尺化に応じてEDFでの吸収係数（単位長さあたりの吸収値）を高めて吸収条長積（吸収係数と長さの積）を一定に保つ必要がある。

【0040】

本第1実施形態におけるEDFの使用長、波長1.53 μm 帯での吸収ピーク値は、それぞれ2.5 m、23.7 dB/mであり、従って吸収条長積は59.25 dBとなる。本実施形態における吸収条長積は、十分なレーザ出力を得る観点から、50 dBより大きい、より好ましくは55 dBより大きい値であることが望ましい。上述したところから明らかなように、EDFにおける分散値と吸収係数との間には、好適なバランスが存在していると言える。EDFにおける波長1.55 μm での分散値をD [ps^2/m]、波長1.53 μm 帯での吸収ピーク値を α [dB/m] とする。正常分散領域での総分散を0.10 ps^2 に設定し、吸収条長積を50 dB以上とすると、EDFの必要長L (m) は $L=0.10/D$ で決まり、吸収値と分散値の比 α/D は500 [dB/ ps^2] より大きいことが好適条件となる。

【0041】

上述のように、吸収値と分散値の比 α/D を好適な値に保ちつつ、 α とDを増加させることが広帯域なノイズライクモードでの発振には有効である。しかしながら、 α を拡大するために過剰にErイオンを添加するとイオン間相互作用による変換効率の低下（濃度消光）を引き起こし、十分な出力を得られなくなる。従って、変換効率を良好に保つためには、Er濃度（吸収係数）がある値を超えて大きくならないように、上限値が存在する。本発明者らは吸収係数の異なるEDFを作製し、1.48 μm 双方向励起配置で励起光から信号光へのパワー変換効率を判定し比較したところ、吸収ピーク値が35 dB/mを超えると顕著なパワー変換効率の低下が観測された。

【0042】

そのため良好な変換効率を維持するためには、吸収ピーク値は35 dB/m以下であることが好ましい。更に、濃度消光による変換効率の低下を抑制するために、EDFにはアルミニウム（Al）を高濃度に共添加することが望ましい。本実施形態のEDF 11においては、4.8 wt%以上の濃度のAlをErと共に添加している。濃度消光抑制の観点からは、Alを3 wt%以上、より好ましくはAlを4 wt%以上の濃度で共添加することが好ましい。

【0043】

また上述のように正常分散ファイバの長さを異常分散ファイバの長さよりも短くするためには、正常分散ファイバであるEDFの分散値が異常分散ファイバであるSMFの分散値絶対値21 ps^2/km より大きいことが必要である。従って正常分散領域での総分散を0.10 ps^2 とし、吸収条長積を50 dB以上に設定すると、必要な吸収ピーク値は10.5 dB/m以上となる。従って本実施形態では、吸収ピーク値は、少なくとも10 dB/m以上であることが必要であることがわかる。

（実施形態2）

【0044】

本発明における第2実施形態について説明する。図4は第2実施形態のファイバレーザの構成図である。このファイバレーザの共振器の構成、並びに各ファイバの条長は、上述した第1実施形態における共振器と同一であり、第1実施形態におけるアウトプットポート81を通して取り出されたノイズライクパルスを高非線形（HNL）ファイバ51に入射

させて、スーパーコンテニウム（SC）発生実験を行った。HNLファイバ51の波長1.55 μm における分散値は $-0.60\text{ps}^2/\text{km}$ 、零分散波長は1.532 μm 、波長1.55 μm における非線形定数は $20/\text{W}/\text{km}$ 、ファイバ長は1kmである。

【0045】

第2実施形態のファイバレーザにおける出力スペクトルを図5（1）に示す。第2実施形態のファイバレーザにおいて950nmの帯域を有するSC光が得られた。残留スペクトル成分が残らずに均質にスペクトルが広がっていることから短パルス成分が束状であることが推測される。また、スペクトルに細かいリプルが存在しない点がノイズライクパルスからのSC光発生の特徴である。

（実施形態3）

【0046】

本発明における第3実施形態について説明する。図6は第3実施形態のファイバレーザの構成図である。このファイバレーザの共振器の構成、並びに各ファイバの条長は、上述した第1実施形態における共振器と同一であり、第1実施形態におけるアウトプットポート81を通して取り出されたノイズライクパルスをSMF33に入射して、パルスの分散耐性を調べた。

【0047】

この時、SMF33の長さは1.6km、分散量は -34ps^2 である。図7に1.6kmSMF33伝送後の自己相関波形を示す。サブピコ秒のフーリエ変換限界（TL）パルスでは、SMF1.6km伝搬後、時間幅の短いパルス成分が残ることは考えにくい、図7では短パルス成分が残留していることがわかる。SMFへの入力パワーを変えても同様の自己相関波形が得られることからソリトン成分が伝搬しているのではないことが明らかである。

（実施形態4）

【0048】

本発明における第4実施形態について説明する。図8は第4実施形態のファイバレーザの構成図である。このファイバレーザの共振器の構成、並びに各ファイバの条長は、上述した第1実施形態における共振器と同一であり、第1実施形態におけるアウトプットポート81を通して取り出されたノイズライクパルスを、先ずSMF33に入射した後に高非線形（HNL）ファイバ51に入射させ、スーパーコンテニウム（SC）の発生実験を行った。

【0049】

第4実施形態のファイバレーザにおける出力スペクトルを図5（2）に示す。第4実施形態のファイバレーザにおいて700nmの帯域幅を有するSC光が観測された。これら第3、第4実施形態の結果からノイズライクパルスにおいて、TLパルスでは見られない分散耐性があることが確認された。

（実施形態5）

【0050】

本発明における第5実施形態について説明する。図9は第5実施形態のファイバレーザの構成図である。図9に示すように、この形態のファイバレーザは、パルスの進行方向に沿って、分散シフトファイバ（DSF）21、シングルモードファイバ（SMF）31、Er添加光ファイバ（EDF）11、DSF23、光合波（WDM）カブラ66、SMF32、DSF22、1/4 λ 偏光板61、1/2 λ 偏光板62、偏波ビームスプリッタ（PBS）63、アイソレータ（ISO）64、1/4 λ 偏光板65が順次配置され、これらを通り、再びDSF21に戻るリング形状の共振器からなっている。励起光源71からの励起光は、WDMカブラ66を通してDSF23に結合され、後方励起配置でEDF11をポンプしている。

【0051】

第5実施形態では、励起光源71として1480nm帯の励起光源を用いている。また出力光はアウトプットポート81を通して取り出され、光スペクトルアナライザ、またはオートコリレータに入射させて、その波形を観測した。EDF11の波長1.55 μm における分散値は、 $38.4\text{ps}^2/\text{km}$ と大きな正常分散を有するEDFを使用し、第5実施形態の

共振器における総分散を、波長 $1.5 \mu\text{m}$ で -0.0027ps^2 となるように設計した。

【0052】

この時、第5実施形態の共振器に用いた各光ファイバの長さは、それぞれ、DSF 21 ; 2.0 m、SMF 31 ; 2.4 m、EDF 11 ; 2.5 m、DSF 23 ; 3.0 m、SMF 32 ; 2.5 m、DSF 22 ; 2.0 m、総ファイバ長は14.0 mとなった。この第5実施形態のファイバレーザにおける出力スペクトルを観測したところ、上述した第1実施形態と同様に、波長 $1.55 \mu\text{m}$ を中心に3 dB帯域幅が87 nmと平坦で広帯域なスペクトルが得られた。

【0053】

またアウトポート81を通して取り出されたノイズライクパルスを高非線形（HNL）ファイバ51に入射させて、スーパーコンテニューム（SC）発生実験を行った。HNLファイバ51の波長 $1.55 \mu\text{m}$ における分散値は $-0.60 \text{ps}^2/\text{km}$ 、零分散波長は $1.532 \mu\text{m}$ 、波長 $1.55 \mu\text{m}$ における非線形定数は $20/\text{W}/\text{km}$ 、ファイバ長は1 kmである。この第5実施形態のファイバレーザにおける出力スペクトルも上述した第2実施形態における出力スペクトルと同様な950 nmの帯域を有するSC光が得られた。

【0054】

上述した第5実施形態の共振器における総分散は、波長 $1.55 \mu\text{m}$ で -0.0027ps^2 となるように設定した。また上述した第1から第4実施形態の共振器における総分散は、波長 $1.55 \mu\text{m}$ で -0.029ps^2 となるように設定した。この総分散量は、零近辺が好ましく、正常分散側にトレランスがあまりないため、本実施形態では、総分散が僅かに異常分散となる設定とした。

【0055】

なお、本発明は上記の実施形態に限定されるものではない。例えば上記実施形態における希土類添加光ファイバとしてEr添加光ファイバを用いたが、他の希土類元素、例えばYb、Nd、Pr、Tb、Sm、Ho等が添加された光ファイバであってもよい。また上記実施形態における共振器を構成する希土類添加光ファイバ以外の光ファイバとして、SMF、DSF、Corning Flexcore1060を用いたが、これらファイバの種類、並びに各ファイバの長さは実施形態に限定されるものではなく、希土類添加光ファイバの分散値、吸収値及び希土類添加光ファイバ以外の光ファイバの分散値に応じて、共振器の分散マップが好適になるように適宜決定されるものである。

【0056】

本実施形態では異常分散ファイバとしてSMFを用いたが、SMFに限定されるものではなく、SMFよりも分散絶対値を下げた異常分散ファイバを用い、異常分散ファイバの長さを長くすることで、スペクトルの広がりにより強調できる。また励起方法は波長 $1.48 \mu\text{m}$ 励起光の後方励起配置としたが、もちろんこの励起波長、励起配置に限定されるものではなく、例えば波長 $0.98 \mu\text{m}$ 励起光、前方励起配置等の組み合わせを採用してもよい。

【0057】

さらに上記実施形態ではモード同期手段として、偏光板と偏波ビームスプリッタを用いたが、この形態に限定されるものではない。他の好適な手段としては、半導体やカーボンナノチューブなどで構成される可飽和吸収体を用いたものがあげられる。また、共振器の形態としてはリング共振器に限定されるものではなく、レーザ発振が可能な共振器から適宜好適に選択されうる。

【0058】

更に、ファイバレーザからの出力光を用いたSC発生の手段として高非線形ファイバを用いたが、この形態に限定されるものではなく他のファイバ、例えば分散シフトファイバ、分散フラットファイバ、フォトリソニッククリスタルファイバであってもよい。

【産業上の利用可能性】

【0059】

本発明により、Er添加ファイバの利得帯域幅を大きく上回る平坦で広帯域なスペクトルを有するファイバレーザを実現することができ、このファイバレーザを用いることによ

り、広帯域な光源を供給することができ、産業上利用価値が高い。

【図面の簡単な説明】

【0060】

【図1】図1は、第1実施形態におけるファイバレーザの構成図である。

【図2】図2は、第1実施形態のファイバレーザにおける出力光のスペクトルを示すグラフである。

【図3】図3は、第1実施形態のファイバレーザにおける出力光の非共軸オートコリレータによる自己相関波形を示すグラフである。

【図4】図4は、第2実施形態におけるファイバレーザの構成図である。

【図5】図5中(1)は、第2実施形態のファイバレーザにおける出力光のスペクトルを示すグラフである。図5中(2)は、第4実施形態のファイバレーザにおける出力光のスペクトルを示すグラフである。

【図6】図6は、第3実施形態におけるファイバレーザの構成図である。

【図7】図7は、第3実施形態のファイバレーザにおける出力光の非共軸オートコリレータによる自己相関波形を示すグラフである。

【図8】図8は、第4実施形態におけるファイバレーザの構成図である。

【図9】図9は、第5実施形態におけるファイバレーザの構成図である。

【図10】図10は、レーザファイバの動作条件を示すグラフである。

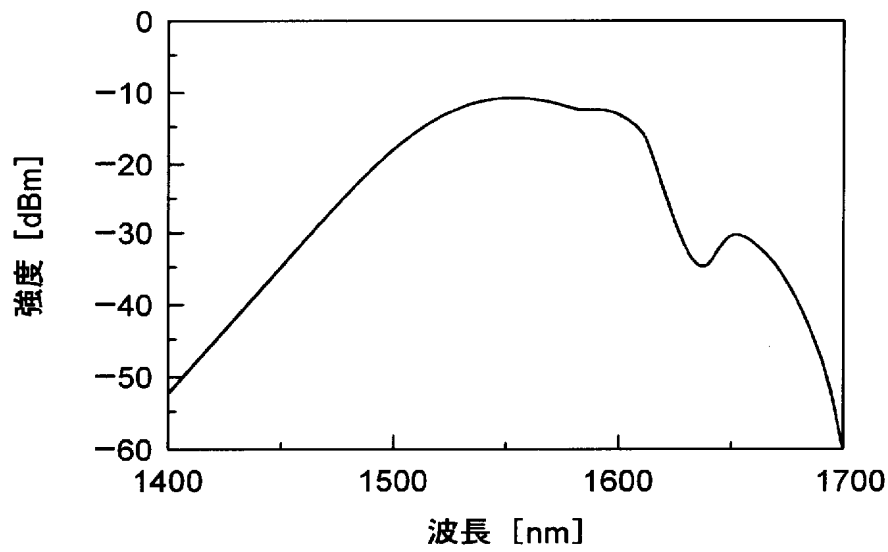
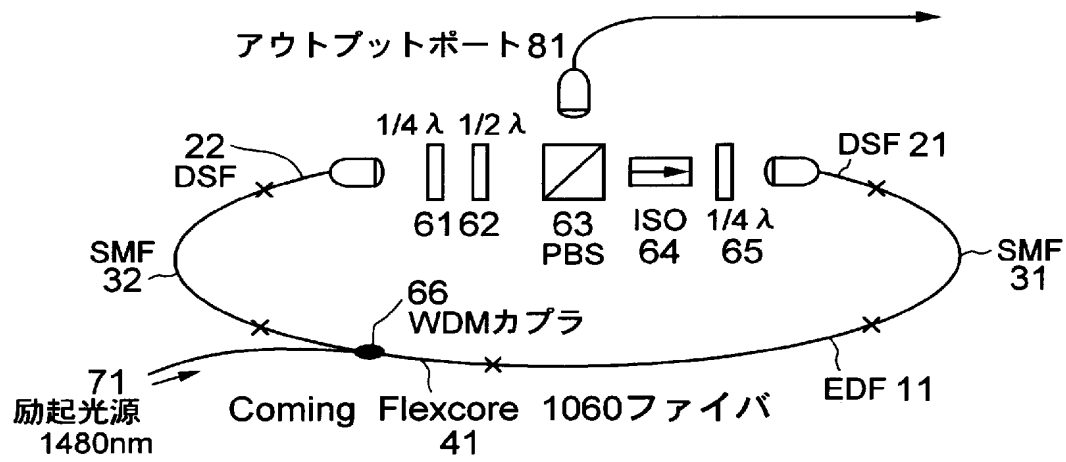
【図11】図11は、ファイバレーザ中のパルス幅とスペクトル幅の変化を示すグラフである。

【図12】図12は実施形態1のファイバレーザにおける出力光の時間波形を示すグラフである。

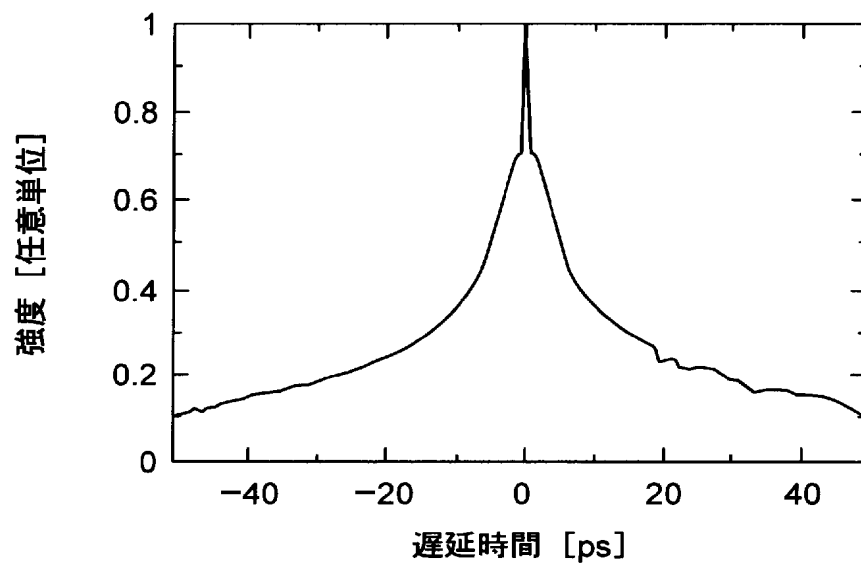
【符号の説明】

【0061】

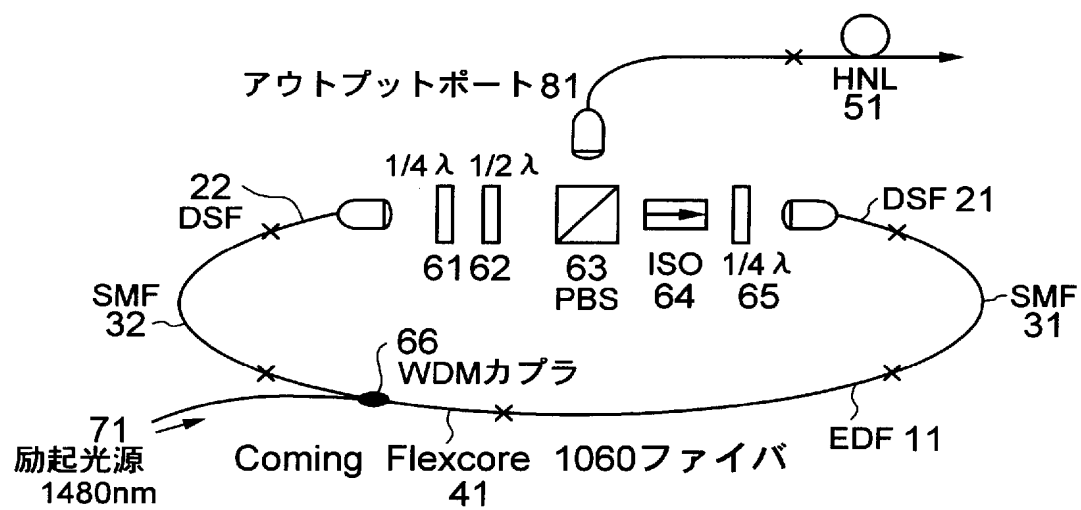
- 1 1 Er添加光ファイバ (EDF)
- 2 1、2 2、2 3 分散シフトファイバ (DSF)
- 3 1、3 2、3 3 シングルモードファイバ (SMF)
- 4 1 Corning Flexcore1060
- 5 1 高非線形 (HNL) ファイバ
- 6 1、6 5 1/4偏光板
- 6 2 1/2偏光板
- 6 3 偏波ビームスプリッタ (PBS)
- 6 4 アイソレータ (ISO)
- 6 6 光合波器 (WDMカプラ)
- 7 1 励起光源
- 8 1 アウトポートポート



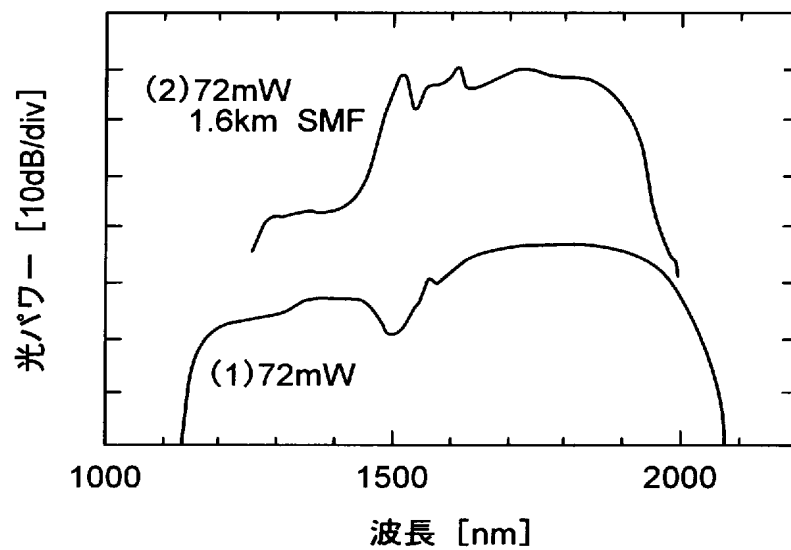
【図 3】



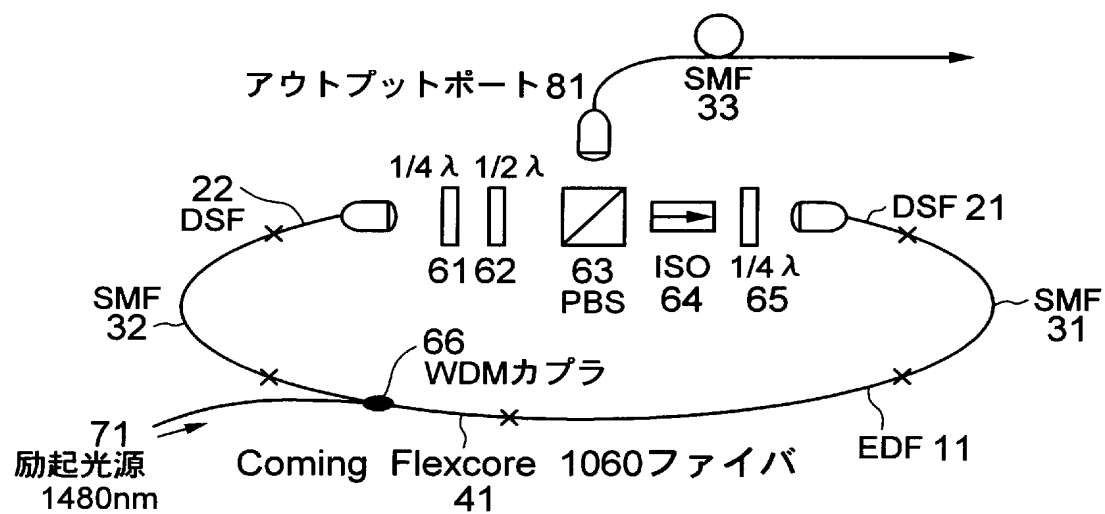
【図 4】



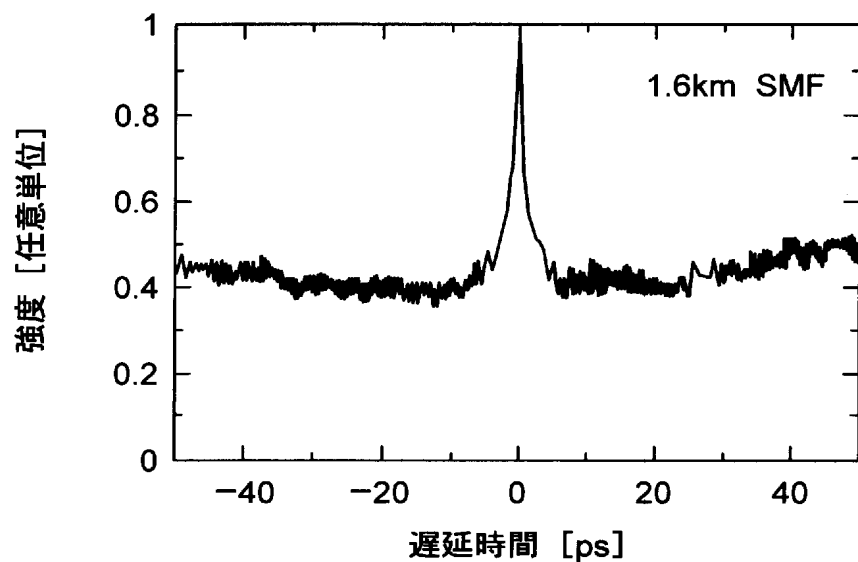
【図 5】



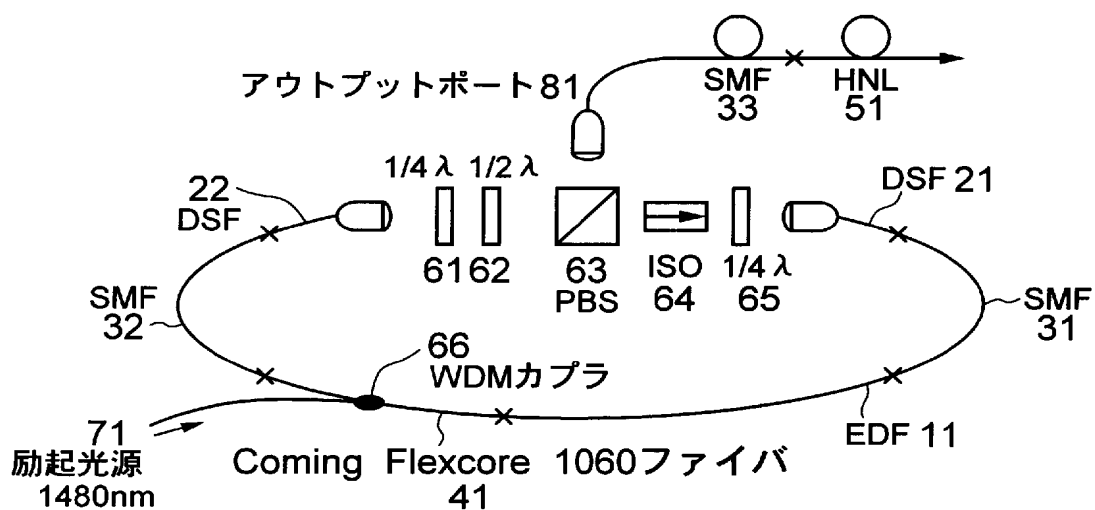
【図 6】



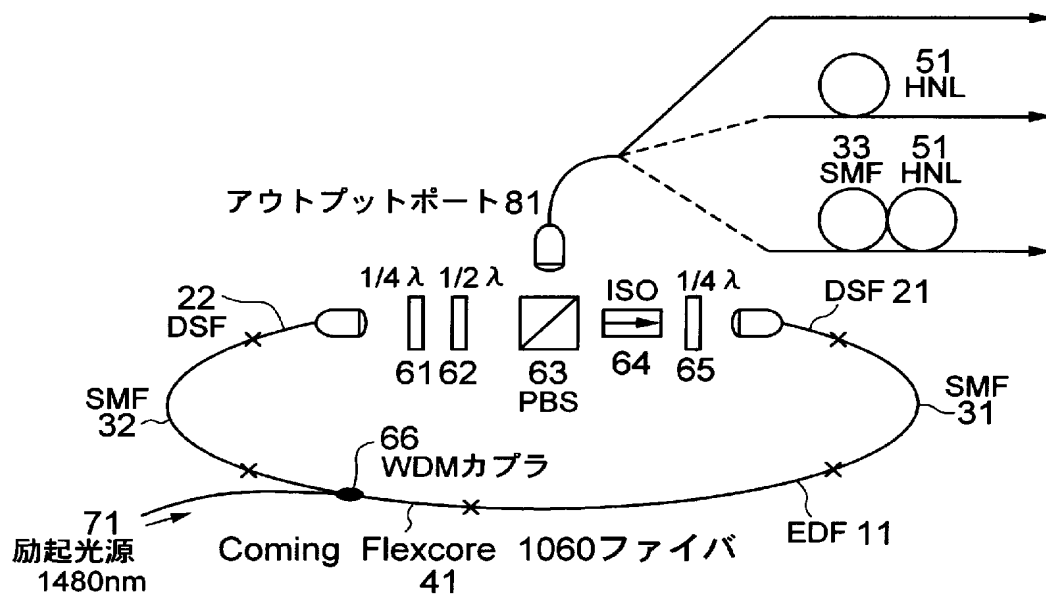
【図 7】



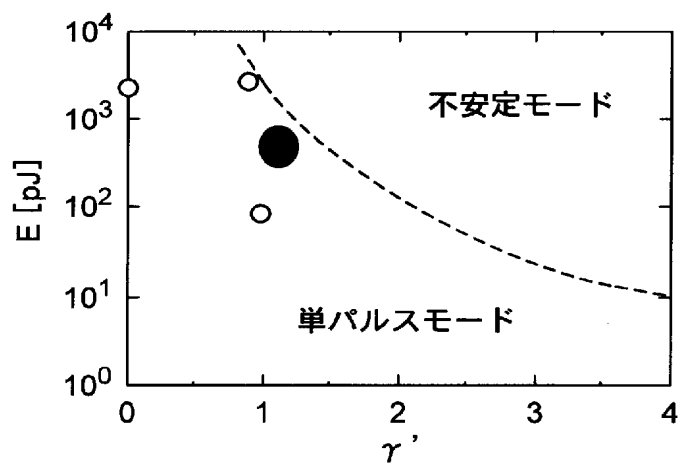
【図 8】



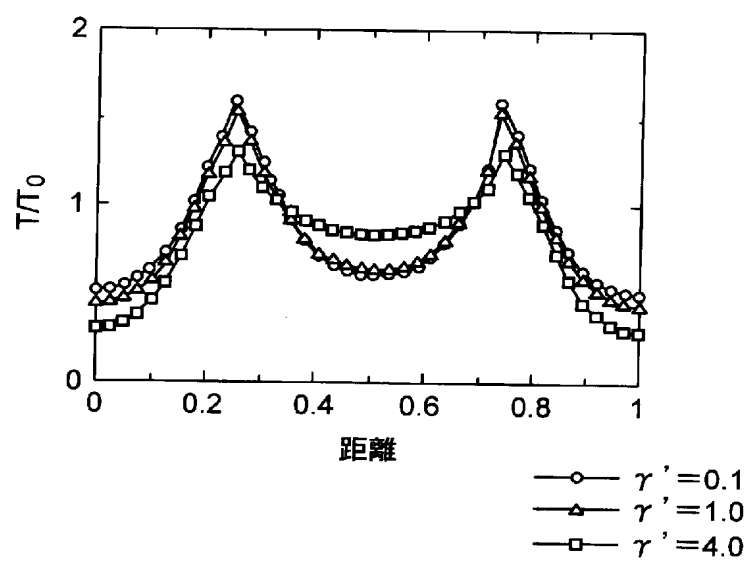
【図 9】



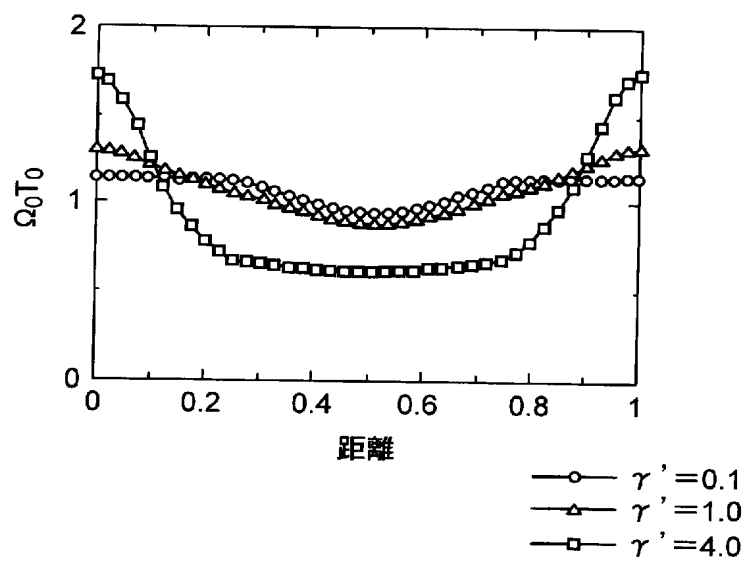
【図 10】

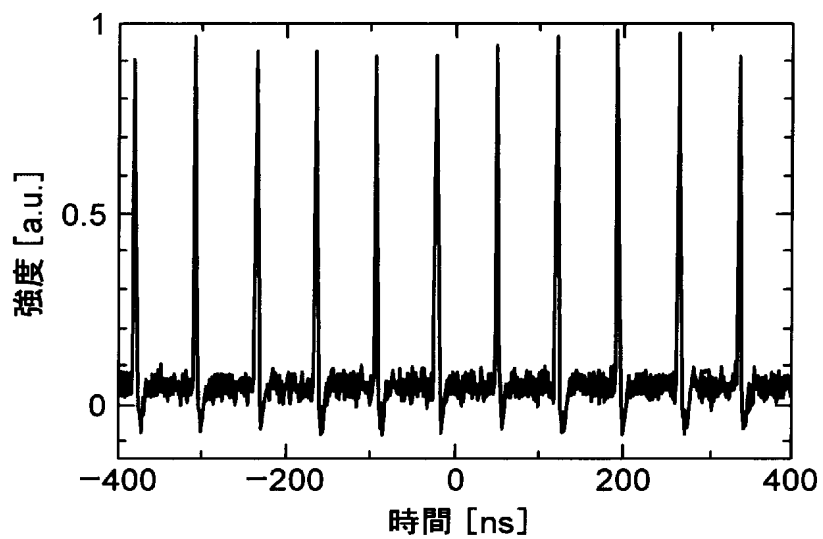


(a)



(b)





【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 ノイズライクレーザにおいて、より広帯域な出力特性を有するファイバレーザおよび光源を提供する。

【解決手段】 共振器内に、正常分散を有する光ファイバと、異常分散を有する光ファイバと、利得媒体としての希土類添加光ファイバと、モード同期機構とを備えたファイバレーザであって、正常分散を有する光ファイバとして少なくとも希土類添加光ファイバを含み、希土類添加ファイバの長さが異常分散を有する光ファイバの長さよりも短く設定されていることを特徴とするファイバレーザ。

【選択図】 図 1

出願人履歴

0 0 0 0 0 5 2 9 0

19900829

新規登録

東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号

古河電気工業株式会社

5 0 0 5 4 0 2 4 6

20010412

住所変更

神奈川県横浜市港北区日吉本町 3 - 2 4 - 3 ラ・ベル日吉 I

I 3 0 6 号

多久島 裕一